



PANELES DE MORTERO CON CELULOSA

Mauricio Pinzón Martínez, Johan Wilmer Pinzón Martínez, Jairo Andrés Rodríguez Laverde

Universidad La Gran Colombia

Facultad de Ingenierías

Especialización en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y

Edificaciones

Ing. Miguel Antonio Caro

Bogotá D.C., junio 10 de 2026

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	8
MARCO TEÓRICO	9
2.1 Impacto social.....	10
2.2 IMPACTO AMBIENTAL.....	11
OBJETIVOS.....	11
3.1 GENERAL	11
3.2 ESPECÍFICOS	12
JUSTIFICACIÓN.....	12
METODOLOGÍA.....	13
5.1 Diseño de mezcla inicial:.....	13
5.2 Modificaciones posteriores:	13
5.3 Ensayos realizados:	13
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	14
ENSAYOS REALIZADOS	15
7.1 Ensayos realizados a los 7 días.....	20
7.2 Ensayo realizado realizados a los 12 días, mezcla con inclusión de arena de río	20
7.3 Ensayo realizado posterior con curado en el horno 24/mayo/2025.....	21
7.4 Ensayo realizado después del secado en el horno a los 28 Días.	21
7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS:.....	28
7.5.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN (28 días).....	29
7.5.2 ANÁLISIS DE DISPERSIÓN.....	30
DISCUSIÓN TÉCNICA.....	32
8.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	34



REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	35
9.1 Preparación de materiales.....	35
9.2 Proceso de mezcla.....	37
9.3 Moldeo de probetas	41
9.4 Proceso de Curado	44
9.5 Ensayos realizados.....	46
9.6 Aplicación del material	53
APLICACIONES DEL MATERIAL	63
10.1 Muros divisorios.....	63
10.2 Paneles prefabricados livianos.	63
10.3 Cerramientos y fachadas livianas.	63
10.4 Vivienda de interés social (VIS).....	63
10.5 Elementos de aislamiento térmico y acústico.....	64
10.6 Soluciones constructivas sostenibles	64
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	64
LIMITACIONES DEL ESTUDIO	65
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS	70

TABLAS

Tabla 1	<i>Esfuerzo Deformación, Ensayos de Resultados.....</i>	<i>15</i>
Tabla 2	<i>Tabla de Resultados Ensayo a la Compresión Último Diseño.</i>	<i>16</i>
Tabla 3	<i>Último Diseño a Compresión Muestra 1</i>	<i>17</i>
Tabla 4	<i>Último Diseño a Compresión Muestra 2</i>	<i>18</i>
Tabla 5	<i>Último Diseño a Compresión Muestra 3</i>	<i>19</i>
Tabla 6	<i>Ensayos a los 7 Días, Mezcla con fibra Plástica.....</i>	<i>20</i>
Tabla 7	<i>Ensayos a los 12 Días Mezcla con Inclusión de Arena de Río.....</i>	<i>20</i>
Tabla 8	<i>Ensayo posterior con curado en el horno 24/mayo/2025</i>	<i>21</i>
Tabla 9	<i>Ensayo después del secado en el horno a los 28 Días.....</i>	<i>21</i>
Tabla 10	<i>Resultados de la Muestra N°12 a los 28 Días.</i>	<i>22</i>
Tabla 11	<i>Resultados de la muestra N°11 a los 28 Días.....</i>	<i>23</i>
Tabla 12	<i>Resultados de la muestra N°10 a los 28 Días.....</i>	<i>24</i>
Tabla 13	<i>Resultados de la Muestra N° 9</i>	<i>25</i>
Tabla 14	<i>Resultados de la Muestra N° 8</i>	<i>26</i>
Tabla 15	<i>Resultados de la Muestra N° 8</i>	<i>27</i>
Tabla 16	<i>Densidad vs Resistencia.....</i>	<i>30</i>
Tabla 17	<i>Resultados Estadísticos.....</i>	<i>31</i>
Tabla 18	<i>Cuadro comparativo con otros Elementos</i>	<i>65</i>

GRAFICAS

Figura 1 Curva Esfuerzo vs Deformación	17
Figura 2 Curva Esfuerzo vs Deformación	18
Figura 3 Curva Esfuerzo vs Deformación	19
Figura 4 Curva Esfuerzo vs Deformación	22
Figura 6 Curva Esfuerzo vs Deformación	24
Figura 7 Curva Esfuerzo vs Deformación	25
Figura 8 Curva Esfuerzo vs Deformación	26
Figura 9 Curva Esfuerzo vs Deformación	27
Figura 10 Consolidación de Ensayos	28
Figura 11 Grafica de Correlación Densidad vs Resistencia	33
Figura 12 Grafica de Correlación Velocidad de Pulso Ultrasonido vs Esfuerzo	33
Figura 13 Fibras Plásticas.	35
Figura 14 Celulosa de Papel.	36
Figura 15 Cemento Tipo 1 Portland Argos.	36
Figura 16 Arena de Río Tamizada y Lavada.	36
Figura 17 Integración de Materiales ya Proporcionados.	37
Figura 18 Proceso de Mezclado.	38
Figura 19 Integración de Fibras.	38
Figura 20 Incorporación a la Mezcla de Espuma.	39
Figura 21 Espuma Final Mejora la Densidad.	39
Figura 22 Se Adiciona Más Cementante.	40
Figura 23 Adición de Otras Fibras No Clasificadas (Lona).	40
Figura 24 Adición de Agua.	41
Figura 25 Cubos Primeras Muestras.	41

Figura 26	Cubos.	41
Figura 27	Cubos y Cilindros.	42
Figura 28	Cilindros de 9 Pulgadas.	42
Figura 29	Laminas.	43
Figura 30	Proceso de Fraguado.	43
Figura 31	Inmersión de los Elementos.	44
Figura 32	Muestras en el Horno a 24 horas.	44
Figura 33	Muestras en el Horno a 24 horas.	45
Figura 34	Muestras en el Horno a 24 Horas.	45
Figura 35	Ensayo a la Compresión Elementos Cilindros.	46
Figura 36	Ensayo a la Compresión de Elemento Cubo.	46
Figura 37	Ensayo a la Compresión de Elemento Cubo.	47
Figura 38	Ensayo a la Compresión de Elemento Cubo	47
Figura 39	Ensayo a Tensión	48
Figura 40	Toma de Dimensiones Elemento cubo	48
Figura 41	Ensayo de Velocidad de Propagación de Ondas Ultrasónicas	49
Figura 42	Ensayo de Velocidad de Propagación de Ondas. Ultrasónicas	49
Figura 43	Ensayo a la Compresión Elemento Cubo.	50
Figura 44	Densidad de la Muestra Cubo.	50
Figura 45	Dimensiones de Muestra Cilindro.	51
Figura 46	Peso de la Muestra Cubo Después de la Absorción	51
Figura 47	Ensayo a la Compresión Elemento Panel.	52
Figura 48	Ensayo a la Compresión Elemento Panel.	52
Figura 49	Instalación del Panel Modular para División de Muros.	53
Figura 50	Instalación del Panel Modular para División de Muros.	53
Figura 51	Instalación del Panel Modular para División de Muros.	54

Figura 52	<i>Instalación del Panel Modular para División de Muros.</i>	54
Figura 53	<i>Instalación del Panel Modular para División Muros con Acabados</i>	55
Figura 54	<i>Panel Modular Para Muros</i>	55
Figura 55	<i>Instalación del Panel Modular para División de Muros.</i>	56
Figura 56	<i>Instalación del Panel Modular para División de Muros.</i>	56
Figura 57	<i>Instalación del Panel Modular para División de Muros.</i>	57
Figura 58	<i>Instalación del Panel Modular para División. de Muros.</i>	57
Figura 59	<i>Instalación del Panel Modular para División.</i>	58
Figura 60	<i>Panel Modular Para Muro y Chimenea.</i>	58
Figura 61	<i>Panel Modular en Fachada</i>	59
Figura 62	<i>Placas Aéreas con Alma en Malla de Acero.</i>	59
Figura 63	<i>Panel Modular en Facha.</i>	60
Figura 64	<i>Sistema de Atrake con el Panel Modular.</i>	60
Figura 65	<i>Sistema de Atrake con el Panel Modular.</i>	61
Figura 66	<i>Panel Modular Texturizado</i>	61
Figura 67	<i>Placa Fácil con Panel Modular</i>	62
Figura 68	<i>Placa Fácil con Panel Modular.</i>	62

INTRODUCCION

El presente informe expone los resultados de una investigación experimental orientada al análisis del comportamiento mecánico de mezclas de mortero modificadas mediante la incorporación de fibras plásticas recicladas y residuos celulósicos (papel), junto con arena de río tamizada como agregado fino. Esta investigación se enmarca en el campo de la innovación en materiales para la construcción civil, con énfasis en el desarrollo de compuestos cementicios más sostenibles y con propiedades funcionales mejoradas.

El estudio consideró la evaluación de parámetros fundamentales como la resistencia a la compresión, la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas (UPV), la densidad aparente y la deformación axial, con el objetivo de caracterizar el desempeño físico mecánico del material y su potencial aplicación en obras de ingeniería civil. La inclusión de materiales reciclados en matrices cementicias responde a una necesidad creciente de reducir el impacto ambiental del sector constructor, fomentar la economía circular y promover el aprovechamiento de residuos sólidos postconsumo.

Desde una perspectiva académica, este trabajo contribuye al conocimiento sobre el comportamiento de materiales compuestos alternativos y plantea una ruta metodológica para su evaluación técnico-científica. Los resultados obtenidos permiten establecer lineamientos preliminares sobre la viabilidad de estas mezclas en aplicaciones no estructurales o de bajo requerimiento mecánico, y sientan las bases para investigaciones futuras orientadas al escalado, optimización del diseño de mezclas y validación bajo normativas técnicas vigentes.

MARCO TEÓRICO

En el contexto actual de desarrollo sostenible, la industria de la construcción enfrenta el desafío de reducir su huella ambiental sin comprometer la calidad y el desempeño técnico de los materiales empleados. El cemento, como principal componente del mortero, es responsable de una significativa proporción de las emisiones globales de CO₂, razón por la cual el desarrollo de materiales cementicios alternativos o modificados adquiere relevancia tanto académica como industrial.

La incorporación de residuos sólidos como fibras plásticas recicladas (principalmente polietileno, PET, polipropileno, entre otros) y papel tratado (con alto contenido de celulosa) en matrices cementicios, ha sido objeto de diversos estudios orientados a mejorar ciertas propiedades del material, tales como la tenacidad, el comportamiento post-fisuración, la capacidad de absorción de energía, y la resistencia al agrietamiento.

Estas adiciones actúan como refuerzos dispersos que modifican la microestructura de la mezcla y pueden influir tanto en su comportamiento mecánico como en sus propiedades físicas.

Asimismo, la caracterización de estas mezclas requiere de metodologías experimentales rigurosas, que incluyan ensayos como la resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico (UPV), análisis de densidad y deformación, para

determinar su aplicabilidad en elementos no estructurales, prefabricados o sistemas constructivos alternativos. La innovación en este campo no solo radica en la utilización de materiales reciclados, sino también en la optimización del diseño de mezclas y la validación de su desempeño frente a estándares técnicos vigentes.



El uso de fibras plásticas recicladas y papel con alto contenido de celulosa en matrices cementicias se ha investigado como alternativa para mejorar propiedades como la tenacidad, la resistencia al agrietamiento y la absorción de energía. Estas adiciones modifican la microestructura del material y requieren ensayos rigurosos de compresión, densidad y velocidad de pulso ultrasónico para validar su aplicabilidad en elementos no estructurales y prefabricados, aportando al desarrollo de soluciones constructivas sostenibles.

2.1 Impacto social

El análisis presentado por los indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC) destaca el crecimiento del PIB y los sectores específicos de la construcción en el segundo trimestre de 2024, lo cual es un indicativo positivo para la economía. En particular, el aumento del 2,4% en el valor agregado de la construcción se ve impulsado por el notable incremento en las obras civiles, lo que puede ser un reflejo de un impulso en la infraestructura y el desarrollo de proyectos grandes. No obstante, es preocupante la disminución del 2,8% en el valor agregado de las edificaciones, lo que sugiere que puede haber desafíos en este subsector, posiblemente relacionados con cambios en la demanda o costos de materiales. (DANE, 2024). Debido a esto, es de vital importancia introducir nuevos materiales a la industria para fortalecer la economía, la ciencia, el desarrollo y crecimiento es así como la intención de introducir un nuevo diseño de mezcla de concreto fluido con fibras recuperadas puede tener múltiples beneficios.

Primero, al reducir el porcentaje del valor agregado de ciertos componentes, se podrían minimizar costos y, al mismo tiempo, crear una opción más sostenible para la construcción. La inclusión de fibras recuperadas no solo mejoraría la resistencia y durabilidad del concreto, sino

que también contribuiría a disminuir la huella ambiental del proceso de construcción.

El énfasis en realizar ensayos experimentales para garantizar la calidad y seguridad del nuevo producto es esencial. Estos ensayos permitirán ajustar los parámetros del diseño, asegurando que el material cumpla con las normativas y expectativas del sector. Esto no sólo es crucial para proteger la inversión en los proyectos futuros, sino que también es un paso hacia un desarrollo más sostenible, alineándose con las tendencias globales de construcción ecológica.

2.2 IMPACTO AMBIENTAL.

Además, es importante considerar que la adaptación a materiales más amigables con el medio ambiente puede abrir nuevas oportunidades en el mercado de la construcción. Los proyectos que utilicen tecnologías o materiales innovadores, que promuevan una construcción más verde, pueden beneficiarse de incentivos gubernamentales, así como de una mejor aceptación por parte de un público cada vez más consciente del impacto ambiental de sus decisiones.

El seguimiento de las tendencias en el sector de la construcción es fundamental para garantizar que las iniciativas propuestas no solo sean viables, sino que también respondan a las necesidades cambiantes del mercado y a las prioridades en términos de sostenibilidad y eficiencia.

OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Obtener un mortero expandido con inclusión de fibras recicladas de plásticos (PET, HDPE, LDPE, PP, PS) y celulosa proveniente de empaques de cemento para uso no estructural (acabados, muros divisorios no portantes y terminados de pisos)

3.2 ESPECÍFICOS

Caracterizar las propiedades mecánicas de una mezcla novedosa de concreto que incorpora fibras de plástico (PET, HDPE, LDPE, PP, PS) y celulosa proveniente de empaques de cemento.

Determinar y analizar las diferentes maneras de incluir el material a la industria para para disponer de diferentes opciones de uso de este como para muros de confinamiento y divisorios.

Analizar la factibilidad económica del nuevo material, al efectuar estimaciones tentativas de costo.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de materiales de construcción sostenibles y de bajo impacto ambiental constituye una prioridad global ante la creciente demanda de infraestructura y los efectos del cambio climático. En este sentido, la presente investigación propone una alternativa innovadora mediante el aprovechamiento de residuos plásticos y celulósicos en la formulación de morteros, promoviendo así prácticas alineadas con la economía circular y la reducción de residuos sólidos urbanos.

Desde un enfoque técnico, este estudio busca aportar conocimiento científico sobre el comportamiento de mezclas modificadas con materiales reciclados, con el fin de validar su desempeño mecánico mediante ensayos normalizados y establecer su viabilidad para aplicaciones prácticas en la construcción civil. La propuesta se justifica no solo por su contribución al desarrollo de tecnologías constructivas más sostenibles, sino también por su potencial para generar soluciones de bajo costo, accesibles y adaptables a contextos urbanos y rural.



En Colombia, el 68 % de la materia prima usada para fabricar papel y cartón proviene de fibras recicladas, lo que refleja un avance en el aprovechamiento de residuos y la economía circular. En este contexto, la investigación propone el uso de residuos plásticos y celulósicos en la elaboración de morteros, con el fin de validar su comportamiento mecánico y promover materiales de construcción sostenibles, de bajo costo y aplicables en diversos entornos.

Asimismo, este trabajo abre la posibilidad de ampliar el espectro de materiales reutilizables en la industria, contribuyendo al avance del conocimiento en el campo de la construcción en Colombia.

METODOLOGÍA.

5.1 Diseño de mezcla inicial:

Cemento portland como aglomerante.

Inclusión de fibras plásticas y papel triturado.

Relación agua/cemento aumentado para facilitar el moldeado.

5.2 Modificaciones posteriores:

Inclusión de arena de río tamizada (pasada por tamiz # 4).

Ajuste de la relación agua/cemento considerando la humedad del papel y la arena

5.3 Ensayos realizados:

Medición de velocidad de propagación de onda.

Determinación de densidad, carga, deformación y módulo de elasticidad estimado.

Ensayo de compresión a diferentes edades (7,12,28 días).

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Consiste en paneles hechos en mortero hidráulico compuesto por: Cemento hidráulico tipo ART, de uso comercial que cumple con la normativa NTC121.

Arena de río lavada, para el desarrollo de morteros y concretos estructurales.

Fibras sintéticas para concreto, para mitigar el agrietamiento, la segregación y mitigar la contracción del mortero.

Celulosa a base de papel constituida por las bolsas de cemento.

ENSAYOS REALIZADOS

Tabla 1

Esfuerzo Deformación, Ensayos de Resultados.

ENSAYO	NORMA	DESCRIPCIÓN
velocidad de pulso ultrasonido (UPV)	ASTMC597	Método de prueba para medir la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos en concreto
Densidad y eso especifico	NTC 4713 ASTM C642	Determinación de densidad, absorción y porosidad del concreto endurecido
Deformación bajo carga / módulo de elasticidad	ASTM C469	Determinación del módulo de elasticidad estática y la deformación en concreto
Absorción de agua / capilaridad	NTC 4818 ASTM C1585	Ensayo para medir la absorción de agua por capilaridad en concreto
Velocidad de pulso ultrasonido (UPV)	ASTM C597	Método para evaluar la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en materiales cementicios
Evaluación de plásticos reciclados	ISO 15270	Guía para la recuperación, reciclaje y reutilización de plásticos posconsumo.

Con relación a los resultados obtenidos se menciona lo siguiente:

Velocidad de pulso ultrasónico promedio: 3863.33m/s.

Esfuerzo deformación: 45KN.

Densidad del material promedio: 1.232 g/cm³.

Módulo de elasticidad: 6Mpa.

Resistencia al fuego: Fuego constante a 300°C por 30 minutos, sin daños en el material ni desprendimientos.

Los materiales compuestos cementicios y fomentando una construcción más consciente, eficiente e innovador.

Tabla 2

Tabla de Resultados Ensayo a la Compresión Último Diseño.

Muestras a 11 días	M #1	M #2	M #3
Masa (gramos)	223,48	237,23	229,4
Velocidad de onda m/s	3521	4132	3937
Compresión kN	32,34	45,3	27,66
Esfuerzo kN/m ²	1346939	1886714	1152020
Esfuerzo en Mpa	13,47	18,87	11,52
Esfuerzo en psi	19536	2735,74	1670,43
Módulo de Young 40%	5,39	7,55	4,61
Módulo de Young 10%	1,35	1,89	1,15

Tabla 3*Último Diseño a Compresión Muestra 1*

Carga (KN)	Carga (N)	Deformación (mm)	Esfuerzo (Mpa)
0,93	930	0,52	0,39
2,97	2970	0,903	1,24
4,94	4940	1,066	2,06
7,47	7470	1,213	3,11
10,64	10640	1,334	4,43
14,24	14240	1,423	5,93
19,44	19440	1,517	8,1
23,3	23300	1,58	9,7
26,82	26820	1,622	11,17
29,81	29810	1,664	12,42
31,82	31820	1,717	13,25
32,34	32340	1,859	13,47

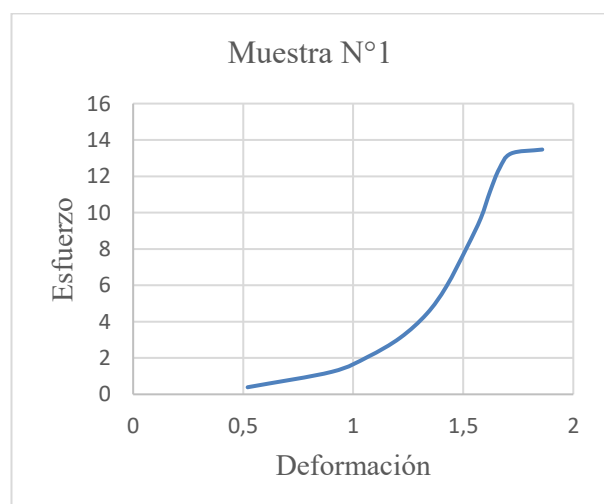
Figura 1*Curva Esfuerzo vs Deformación*

Tabla 4*Último Diseño a Compresión Muestra 2*

Carga (KN)	Carga (N)	Deformación (mm)	Esfuerzo (Mpa)
1,15	1150	0,205	0,48
3,15	31150	0,404	1,31
6,12	6120	0,551	2,55
8,45	8450	0,62	3,52
11,1	11100	0,677	4,62
15,32	15320	0,74	6,38
18,27	18270	0,777	7,61
22,76	22760	0,824	9,48
25,75	25750	0,851	10,72
31,88	31880	0,893	13,28
36,21	36210	0,898	15,08
40,04	40040	0,903	16,68

Figura 2*Curva Esfuerzo vs Deformación*

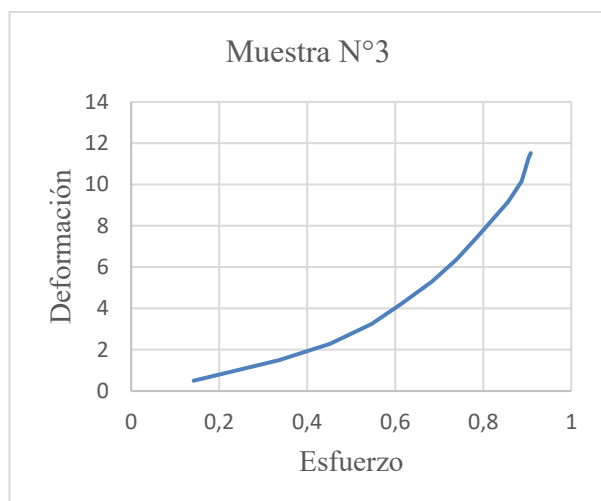
Tabla 5

Último Diseño a Compresión Muestra 3

Carga (KN)	Carga (N)	Deformación (mm)	Esfuerzo (Mpa)
1,2	1200	0,142	0,5
3,6	3600	0,336	1,5
5,51	5510	0,452	2,29
7,8	7800	0,546	3,25
10,15	10150	0,614	4,23
12,71	12710	0,683	5,29
15,31	15310	0,74	6,38
18,01	18010	0,788	7,5
21,96	21,96	0,856	9,15
24,4	24400	0,887	10,16
27,12	27120	0,903	11,3
27,66	27660	0,908	11,52

Figura 3

Curva Esfuerzo vs Deformación



7.1 Ensayos realizados a los 7 días

Tabla 6

Ensayos a los 7 Días, Mezcla con fibra Plástica

Cubo	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Velocidad de Onda (m/s)	Compresión (kN)
1	142	110,6	1,284	3151	15,03
2	139,46	110,6	1,261	3382	15,4
3	139,91	121,5	1,151	3122	15,7

7.2 Ensayo realizado realizados a los 12 días, mezcla con inclusión de arena de río

Tabla 7

Ensayos a los 12 Días Mezcla con Inclusión de Arena de Río.

Muestra	Compresión (kN)	Deformación (mm)	Velocidad de Onda (m/s)
1	7,83	1,066	2358
2	11,35	0,792	2857
3	10,93	0,781	2646
4	9,6	1,031	2577
5	8,21	0,632	2513
6	10,85	0,517	2591

7.3 Ensayo realizado posterior con curado en el horno 24/mayo/2025

Tabla 8

Ensayo posterior con curado en el horno 24/mayo/2025

Muestra	Peso seco (g)	Compresión (kN)	Deformación (mm)
7	116,97	6,25	3,195
8	142,25	11,12	0,782
9	126,99	10,08	1,615
10	153,80	16,98	0,787
11	143,55	11,83	0,639
12	159,09	16,92	0,749

7.4 Ensayo realizado después del secado en el horno a los 28 Días.

Tabla 9

Ensayo después del secado en el horno a los 28 Días.

N° De muestra	Peso (gr)	Volumen (cm ³)	Densidad (gr/cm ³)	Velocidad de Onda (m/s)	Compresión (KN)	Deformación (mm)	Fecha
12	157,71	122,5	1,287	2463	16,84	0,7	10/05/2025
11	154,43	115,248	1,339	2283	13,66	0,86	10/05/2025
10	149,53	120,05	1,245	2451	14,93	0,816	10/05/2025
9	147,97	125	1,184	2358	13,88	0,898	10/05/2025
8	146,85	117,649	1,248	22,83	14,08	0,909	10/05/2025
7	147,38	125	1,179	2273	15,76	0,413	10/05/2025

Tabla 10

Resultados de la Muestra N°12 a los 28 Días.

N° De lecturas	Deformación	Esfuerzo
1	0,131	0,16
2	0,268	0,54
3	0,389	1,67
4	0,436	2,23
5	0,509	3,71
6	0,546	4,58
7	0,578	5,49
8	0,609	6,48
9	0,641	7,51
10	0,667	8,52
11	0,693	9,58
12	0,719	10,6
13	0,746	11,64
14	0,772	12,61
15	0,798	13,5
16	0,83	14,29
17	0,866	15,02
18	0,903	15,63
19	0,945	16,14
20	0,982	16,37
21	1,008	16,51
22	1,016	16,67
23	1,118	16,74

Figura 4

Curva Esfuerzo vs Deformación

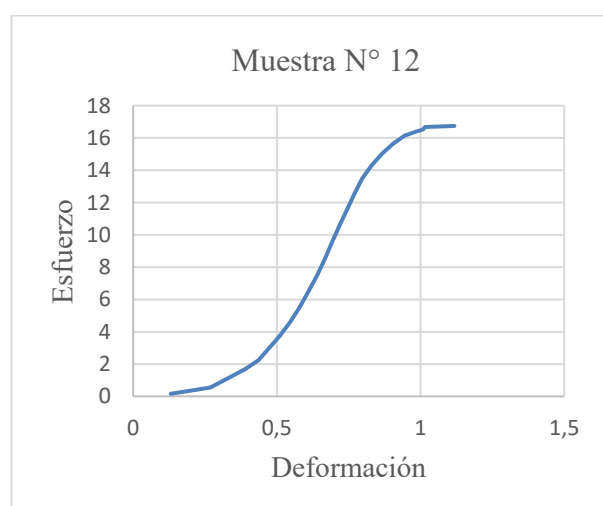


Tabla 11

Resultados de la muestra N°11 a los 28 Días

N° De lecturas	Deformación	Esfuerzo
1	0,347	0,99
2	0,399	1,32
3	0,452	1,73
4	0,509	2,2
5	0,562	2,75
6	0,614	3,35
7	0,667	3,99
8	0,714	4,64
9	0,756	5,31
10	0,798	6,05
11	0,835	6,74
12	0,866	7,52
13	0,903	8,21
14	0,935	8,86
15	0,961	9,48
16	0,987	10,03
17	1,003	10,57
18	1,024	11,06
19	1,045	11,53
20	1,006	11,95

Tabla 12

Curva Esfuerzo vs Deformación

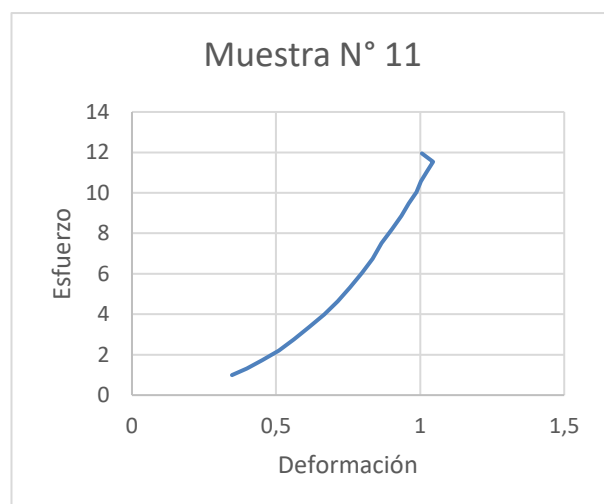


Tabla 13

Resultados de la muestra N°10 a los 28 Días

N° De lecturas	Deformación	Esfuerzo
1	0,289	0,32
2	0,341	0,57
3	0,399	0,86
4	0,415	1,07
5	0,452	1,64
6	0,473	1,97
7	0,497	2,36
8	0,514	2,83
9	0,536	3,38
10	0,546	4
11	0,562	4,65
12	0,587	5,38
13	0,625	6,87
14	0,652	7,64
15	0,683	8,38
16	0,714	9,15
17	0,746	9,87
18	0,782	10,57
19	0,876	11,77
20	1,029	12,45

Figura 5

Curva Esfuerzo vs Deformación

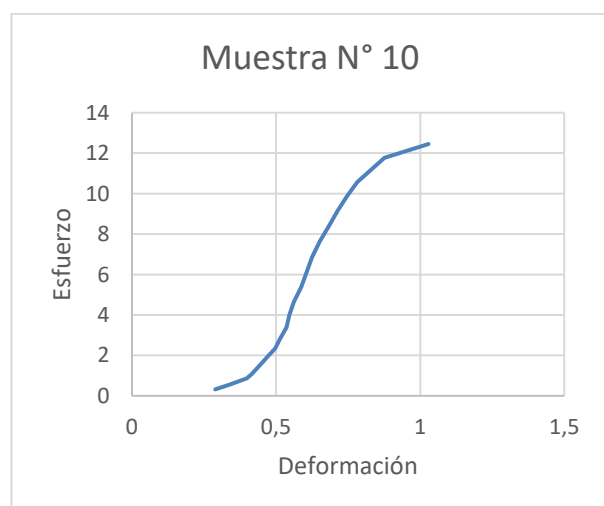


Tabla 14*Resultados de la Muestra N° 9*

N° De lecturas	Deformación	Esfuerzo
1	0,226	0,68
2	0,257	0,87
3	0,278	1,1
4	0,306	1,38
5	0,356	2,06
6	0,39	2,46
7	0,425	2,9
8	0,465	3,41
9	0,541	4,52
10	0,578	5,15
11	0,609	5,78
12	0,639	6,55
13	0,662	7,35
14	0,688	8,13
15	0,709	8,94
16	0,735	9,74
17	0,765	10,51
18	0,798	11,25
19	0,812	11,96
20	0,839	12,6
21	0,924	13,13
22	0,982	13,5

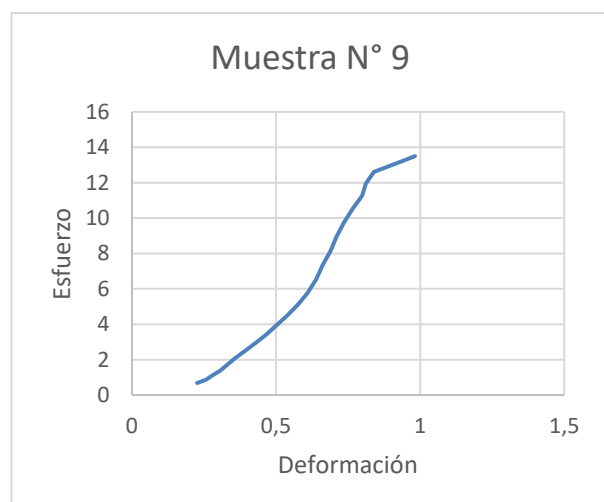
Figura 6*Curva Esfuerzo vs Deformación*

Tabla 15*Resultados de la Muestra N° 8*

N° De lecturas	Deformación	Esfuerzo
1	0,021	0,04
2	0,053	0,1
3	0,79	0,19
4	0,089	0,28
5	0,089	0,42
6	0,173	0,88
7	0,21	1,23
8	0,273	1,48
9	0,278	2,16
10	0,32	2,71
11	0,357	3,38
12	0,383	4,15
13	0,442	4,87
14	0,415	4,97
15	0,443	5,97
16	0,467	6,87
17	0,498	7,83
18	0,513	8,79
19	0,53	9,77
20	0,543	10,63

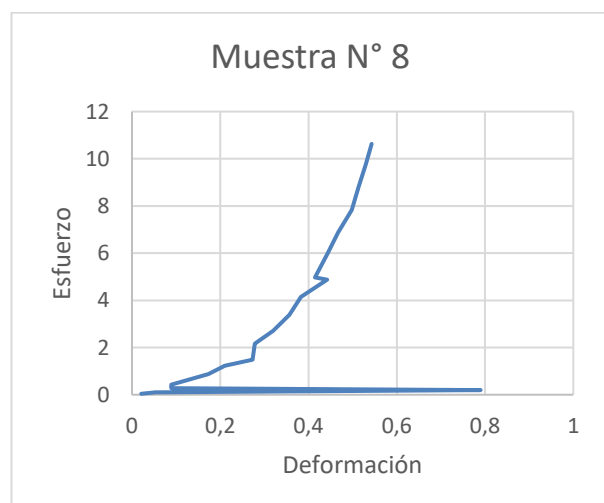
Figura 7*Curva Esfuerzo vs Deformación*

Tabla 16*Resultados de la Muestra N° 8*

N° De lecturas	Deformación	Esfuerzo
1	0,236	0,55
2	0,278	0,8
3	0,32	1,13
4	0,378	1,52
5	0,483	2
6	0,536	2,54
7	0,599	3,12
8	0,656	3,75
9	0,709	4,48
10	0,756	5,22
11	0,803	5,99
12	0,84	6,77
13	0,877	7,61
14	0,914	8,45
15	0,945	9,28
16	0,977	10,08
17	1,003	10,83
18	1,029	11,55
19	1,045	12,21
20	1,88	12,97
21	1,89	13,66
22	1,95	14,03

Figura 8

Curva Esfuerzo vs Deformación

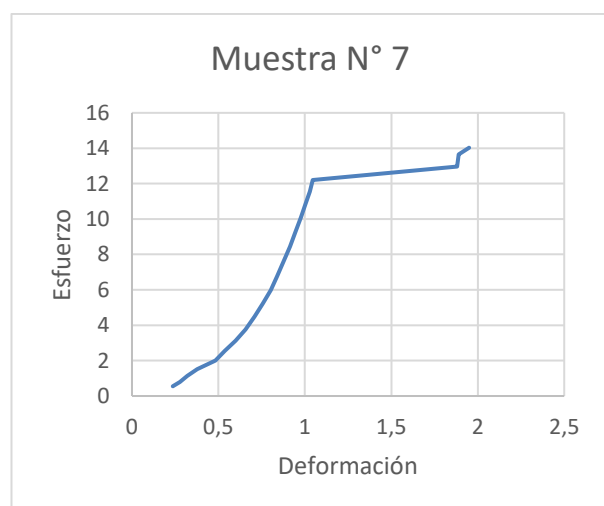


Figura 9*Consolidación de Ensayos*

Diseño	Días	Muestras	Masa g	Area m2	Altura m	Velocidad de onda m/s	Compresión kN	Esfuerzo kN/m2	Esfuerzo en Mpa	Esfuerzo en psi	Modulo de young 40% Mpa	Modulo de young 10% Mpa	Densidad g/cm3
Ultimo relación Agua/cemento controlada	11	M #1	223,48	0,002401	0,048	3521	32,34	13469,39	13,47	1953,06	5,39	1,35	1,79
		M #2	237,23	0,002401	0,048	4132	45,3	18867,14	18,87	2735,74	7,55	1,89	1,90
		M #3	229,4	0,002401	0,048	3937	27,66	11520,20	11,52	1670,43	4,61	1,15	1,84
Inclusión fibras plasticas 2 in	28	M #12	157,71	0,002401	0,048	2463	16,84	7013,74	7,01	1016,99	2,81	0,70	1,26
		M #11	154,43	0,002401	0,048	2283	13,66	5689,30	5,69	824,95	2,28	0,57	1,24
		M #10	149,53	0,002401	0,048	2451	14,93	6218,24	6,22	901,65	2,49	0,62	1,20
		M #9	147,97	0,002401	0,048	2358	13,88	5780,92	5,78	838,23	2,31	0,58	1,18
		M #8	146,85	0,002401	0,048	22,83	14,08	5864,22	5,86	850,31	2,35	0,59	1,17
		M #7	147,38	0,002401	0,048	2273	15,76	6563,93	6,56	951,77	2,63	0,66	1,18
Inclusión fibras plasticas 2in	7	M #1	142	0,002401	0,048	3151	15,03	6259,89	6,26	907,68	2,50	0,63	1,14
		M #2	139,46	0,002401	0,048	3382	15,4	6413,99	6,41	930,03	2,57	0,64	1,12
		M #3	139,91	0,002401	0,048	3122	15,7	6538,94	6,54	948,15	2,62	0,65	1,12
Inclusión de arena río	12	M #1	116,97	0,002401	0,048	2358	7,83	3261,14	3,26	472,87	1,30	0,33	0,94
		M #2	142,25	0,002401	0,048	2857	11,35	4727,20	4,73	685,44	1,89	0,47	1,14
		M #3	126,99	0,002401	0,048	2646	10,93	4552,27	4,55	660,08	1,82	0,46	1,02
		M #4	153,8	0,002401	0,048	2577	9,6	3998,33	4,00	579,76	1,60	0,40	1,23
		M #5	143,55	0,002401	0,048	2513	8,21	3419,41	3,42	495,81	1,37	0,34	1,15
		M #6	159,09	0,002401	0,048	2591	10,85	4518,95	4,52	655,25	1,81	0,45	1,27
Inclusión de arena de río pero curado al horno por 24 a 60°C	28	M #7	116,97	0,002401	0,048	2358	6,25	2603,08	2,60	377,45	1,04	0,26	0,94
		M #8	142,25	0,002401	0,048	2857	11,12	4631,40	4,63	671,55	1,85	0,46	1,14
		M #9	126,99	0,002401	0,048	2646	10,08	4198,25	4,20	608,75	1,68	0,42	1,02
		M #10	153,8	0,002401	0,048	2577	16,98	7072,05	7,07	1025,45	2,83	0,71	1,23
		M #11	143,55	0,002401	0,048	2513	11,83	4927,11	4,93	714,43	1,97	0,49	1,15
		M #12	159,09	0,002401	0,048	2591	16,92	7047,06	7,05	1021,82	2,82	0,70	1,27

Se tuvo en cuenta los datos más significativos para graficar, según el diseño de mezcla, los materiales agregados y sus dosificaciones como también su relación agua cemento, al determinar el % de retención de agua de la celulosa verificamos en posteriores ensayos que la relación mejoraba significativamente, al disminuir el agua su resistencia aumenta con un pico de 18 Mpa en solo 11 días determinando que este diseño sería la base para continuar con los ensayos siguientes enunciados en las limitaciones.

A partir de esto se evidencia mejoría en la resistencia y se proyecta que mejorando las dimensiones de las fibras disminuyendo la porosidad sin afectar la densidad podremos obtener un compuesto con mayores picos de resistencia a los 28 días. Ilustración 1 Fibras plásticas celulosa cemento y espumante.

7.5 ANALISIS ESTADISTICO DE RESULTADOS:

M1 = 13.47 Mpa.

M2 = 18.87 Mpa.

M3 = 11.52 Mpa.



7.5.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN (28 días)

Datos:

$$f'_c = [13.47, 18.87, 11.52] \text{ MPa}$$

◆ Promedio (Media)

$$\bar{x} = \frac{13.47 + 18.87 + 11.52}{3} = 14.62 \text{ MPa}$$

◆ Coeficiente de variación (CV)

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

$$CV = \frac{3.81}{14.62} \times 100 = 26.0\%$$

◆ Desviación estándar (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Cálculo:

- $(13.47 - 14.62)^2 = 1.32$
- $(18.87 - 14.62)^2 = 18.06$
- $(11.52 - 14.62)^2 = 9.61$

$$\sigma = \sqrt{\frac{28.99}{2}} = \sqrt{14.49} = 3.81 \text{ MPa}$$

En materiales de construcción:

< 10% → excelente.

10–20% → aceptable.

20% → alta variabilidad.



El material presenta variabilidad significativa en la resistencia, lo cual puede estar asociado a:

Distribución no homogénea de fibras.

Variación en contenido de humedad (celulosa).

Relación agua/cemento no controlado.

Tabla 17

Densidad vs Resistencia

Muestra	Densidad	f _c (MPa)
M1	1.89	13.47
M2	2.01	18.87
M3	1.95	11.52

Se observa una correlación positiva entre la densidad del material y la resistencia a compresión, lo cual sugiere que una menor porosidad interna contribuye significativamente al incremento de la capacidad mecánica del compuesto.

7.5.2 ANÁLISIS DE DISPERSIÓN

Rango:

$$R = 18.87 - 11.52 = 7.35 \text{ MPa}$$

Diferencia del 50% entre muestras ya que hubo aspectos como variabilidad en la humedad, relación agua cemento, precisión en los volúmenes de la mezcla, esto permite organizar el proceso de fabricación para disminuir este porcentaje de dispersión

♦ Resistencia característica estimada

$$f'_{c_{estimada}} = \bar{x} - 1.65\sigma$$

$$f'_c = 14.62 - (1.65 \times 3.81) = 14.62 - 6.29 = 8.33 \text{ MPa}$$

La alta variabilidad observada en los resultados de resistencia ($CV = 26\%$) puede explicarse en gran medida por la absorción de agua de la celulosa, la cual alcanzó un valor del 60%. Este comportamiento higroscópico genera una retención significativa de agua dentro de la mezcla, afectando la relación agua-cemento efectiva y promoviendo la formación de vacíos internos, lo que reduce la resistencia mecánica y aumenta la dispersión de los resultados.

Considerando que la celulosa presenta una absorción de agua del 60%, se realizó un ajuste en la relación agua-cemento con el fin de determinar la cantidad de agua efectiva disponible para la hidratación del cemento. Se estableció que parte del agua de mezclado es retenida por la celulosa, reduciendo la relación agua-cemento efectiva. Por lo tanto, se propone corregir el contenido de agua mediante la adición del volumen equivalente al agua absorbida o mediante la pre-saturación del material celulósico, con el fin de garantizar una dosificación más precisa y un comportamiento mecánico más uniforme.

Con el fin de evaluar la uniformidad y comportamiento mecánico del material desarrollado, se realizó un análisis estadístico de los resultados de resistencia a compresión, empleando como parámetro principal el esfuerzo máximo a compresión en MPa. Se calcularon el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) para cada diseño de mezcla.

Tabla 18

Resultados Estadísticos

Diseño de mezcla	Edad (días)	Número de muestras	Resistencia promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coeficiente de variación (%)
Última relación agua/cemento controlado	11	3	14,62	3,81	26,00
Inclusión de fibras plásticas	28	6	6,19	0,48	7,70
Inclusión de fibras plásticas	7	3	6,40	0,14	2,10
Inclusión de arena de río	12	6	4,08	0,56	13,70

Inclusión de arena de río + curado en horno	28	6	5,08	1,63	32,00
---	----	---	------	------	-------

Los resultados estadísticos muestran diferencias importantes entre los distintos diseños evaluados.

La mezcla con relación agua-cemento controlada presentó la mayor resistencia promedio, alcanzando un valor de 14,62 MPa. Sin embargo, su coeficiente de variación fue de 26%, indicando una alta dispersión entre resultados y, por lo tanto, una menor uniformidad en el comportamiento mecánico.

Las mezclas con inclusión de fibras plásticas mostraron resistencias promedio cercanas a 6 MPa, con coeficientes de variación de 7,7% a 28 días y 2,1% a 7 días, lo cual evidencia una mayor estabilidad y repetibilidad en el proceso de fabricación.

En el caso de la inclusión de arena de río, se obtuvo una resistencia promedio de 4,08 MPa, con un coeficiente de variación de 13,7%, lo que representa un comportamiento intermedio en términos de uniformidad.

Finalmente, la mezcla con arena de río y curado en horno alcanzó una resistencia promedio de 5,08 MPa, pero presentó el coeficiente de variación más alto (32%), indicando que el proceso de curado térmico no mejoró la homogeneidad del material y pudo haber generado efectos adversos sobre su microestructura.

DISCUSIÓN TÉCNICA

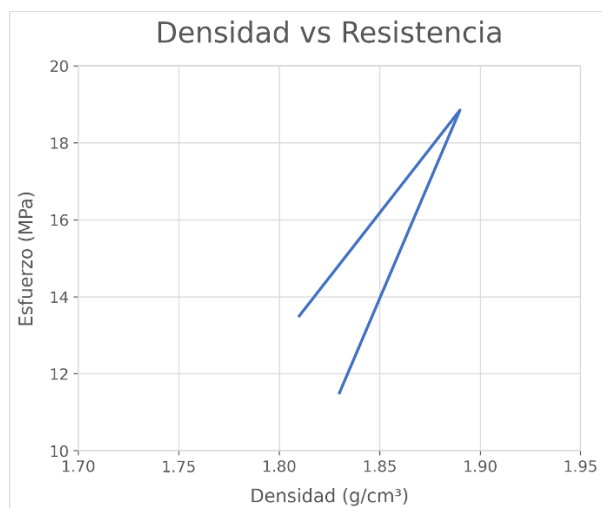
Los resultados obtenidos permiten establecer que la resistencia mecánica del material está fuertemente influenciada por variables como la relación agua-cemento, la absorción de agua de la celulosa y el tipo de curado aplicado.

La absorción de agua de la celulosa, estimada en **60%**, afecta directamente la relación agua-cemento efectiva, generando una distribución irregular del agua dentro de la mezcla. Esto explica, en gran parte, la variabilidad observada en algunos diseños, especialmente en la mezcla con relación agua-cemento controlada.

Aunque la mezcla con mayor resistencia fue la de relación agua-cemento controlada, las mezclas con fibras plásticas presentaron mejores niveles de uniformidad, lo que representa una ventaja desde el punto de vista de confiabilidad del material.

Figura 10

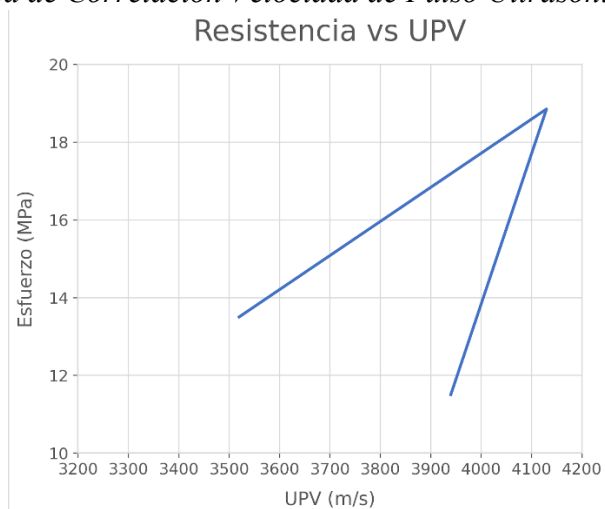
Grafica de Correlación Densidad vs Resistencia



Se observa una tendencia creciente entre la densidad del material y la resistencia a la compresión, lo cual indica que una mayor compactación y menor porosidad interna favorecen el desarrollo de la capacidad mecánica del compuesto.

Figura 11

Grafica de Correlación Velocidad de Pulso Ultrasonido vs Esfuerzo



Los resultados evidencian una correlación positiva entre la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) y la resistencia a la compresión, lo que confirma que este ensayo no destructivo puede emplearse como indicador indirecto de la calidad y homogeneidad del material.

8.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la incorporación de materiales reciclados, específicamente celulosa de papel y fibras plásticas, tiene una influencia significativa en el comportamiento mecánico del material cementicio desarrollado.

En términos generales, se observó que la resistencia a compresión varió entre 4 MPa y 18 MPa, dependiendo del diseño de mezcla y las condiciones de fabricación. La mezcla con relación agua-cemento controlada presentó el mayor valor promedio (14,62 MPa); sin embargo, evidenció una alta dispersión de resultados (coeficiente de variación del 26%), lo cual indica una baja uniformidad en el comportamiento del material.

Esta variabilidad puede explicarse principalmente por la absorción de agua de la celulosa, la cual fue determinada en un 60%. Este alto nivel de absorción genera una alteración significativa en la relación agua-cemento efectiva, ya que una parte del agua de mezclado es retenida por la celulosa y no participa directamente en el proceso de hidratación del cemento. Como consecuencia, se produce una distribución no homogénea del agua en la mezcla, lo que favorece la formación de vacíos internos y reduce la resistencia mecánica del material.

Por otro lado, las mezclas con inclusión de fibras plásticas presentaron resistencias promedio cercanas a 6 MPa, pero con coeficientes de variación significativamente menores (entre 2,1% y 7,7%), lo cual indica un comportamiento más uniforme y estable. Este resultado sugiere que la incorporación de fibras contribuye a mejorar la homogeneidad de la mezcla y a controlar la propagación de fisuras, aunque no incrementa significativamente la resistencia máxima.

En cuanto a la inclusión de arena de río, se observó una disminución en la resistencia a compresión ($\approx 4,08$ MPa), lo cual puede atribuirse a una menor adherencia entre la matriz cementicia y los materiales reciclados, así como a una posible alteración en la distribución granulométrica del sistema. Este comportamiento indica que la sustitución parcial de agregados debe ser cuidadosamente controlada para evitar pérdidas en el desempeño mecánico.

Respecto al curado en horno (60°C durante 24 horas), los resultados mostraron una alta variabilidad (CV $\approx$ 32%) sin una mejora significativa en la resistencia promedio. Este comportamiento puede estar asociado a la

generación de micro fisuras internas debido a gradientes térmicos o a una evaporación acelerada del agua, lo que afecta negativamente la microestructura del material.

Adicionalmente, se identificó una correlación directa entre la densidad y la resistencia a compresión, evidenciando que mezclas con mayor densidad presentan mejores desempeños mecánicos. Este comportamiento está relacionado con una menor porosidad interna y una mejor compactación del material.

De igual manera, los resultados del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) mostraron una tendencia consistente con la resistencia a compresión, lo que sugiere que este método no destructivo puede ser utilizado como herramienta complementaria para evaluar la calidad y homogeneidad del material.

En conjunto, los resultados indican que el material desarrollado presenta un comportamiento adecuado para aplicaciones no estructurales; sin embargo, su desempeño está fuertemente condicionado por el control de variables como la relación agua-cemento, la humedad de la celulosa y el proceso de fabricación. La optimización de estos factores es fundamental para mejorar la uniformidad y confiabilidad del material en aplicaciones constructivas reales.

REGISTRO FOTOGRÁFICO

9.1 Preparación de materiales

Figura 12

Fibras Plásticas.



Nota: para el diseño del mortero se agrego fibras plasticas procesadas

Figura 13

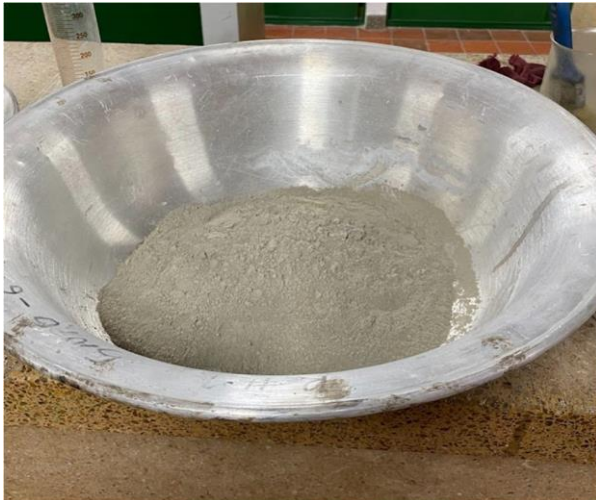
Celulosa de Papel.



Nota: para el diseño se agrego celulosa derivada de las fibras obtenidas del papel y carton

Figura 14

Cemento Tipo 1 Portland Argos.



Nota: Se adiciono cemento tipo portland

Figura 15

Arena de Río Tamizada y Lavada.

Nota: Se adiciono arena gris lavada y tamizada



9.2 Proceso de mezcla

Figura 16

Integración de Materiales ya Proporcionados.



Nota: materiales listos y dosificados para la mezcla

Figura 17

Proceso de Mezclado.



Nota: Proceso de mezclado, se incorporan los materiales en seco

Figura 18

Integración de Fibras.



Nota: Se agregan las fibras sintética en seco a la mezcla previa

Figura 19

Incorporación a la Mezcla de Espuma.



Nota: a la mezcla en seco se le agrega agua para generar una pasta hidratada y posteriormente la espuma

Figura 20

Espuma Final Mejora la Densidad.



Nota: Se adiciona la espuma a la mezcla

Figura 21

Se Adiciona Más Cementante.



Nota : se adisiona mas cemento para mejorar la pasta

Figura 22

Adición de Otras Fibras No Clasificadas (Lona).



Nota: incorporamos fibras plasticas recicladas para evaluar su comportamineto mecanico

Figura 23

Adición de Agua.



Nota: dosificamos mas agua para incorporar a la mezcla

9.3 Moldeo de probetas

Figura 24

Cubos Primeras Muestras.



Figura 25 Cubos



Figura 26

Cubos y Cilindros.



Notas: Se prepararon muestras en cilindros y cubos

Figura 27

Cilindros de 9 Pulgadas.



Nota: cilindros desencofrados para posterior falla

Figura 28

Laminas.



Nota: laminas para evaluar otras metricas como velocidad de onda

Figura 29

Proceso de Fraguado.



Nota: Elaboración de muestras para diferentes edades

9.4 Proceso de Curado

Figura 30

Inmersión de los Elementos.



Nota : Curado de muestras en inmersión completa

Figura 31

Muestras en el Horno a 24 horas.



Figura 32

Muestras en el Horno a 24 horas.



Nota: Muestras en horno a 60°C

Figura 33

Muestras en el Horno a 24 Horas.



Nota: Cubos en horno a 60°C

9.5 Ensayos realizados.

Figura 34

Ensayo a la Compresión Elementos Cilindros.



Figura 35

Ensayo a la Compresión de Elemento Cubo.



Figura 36

Ensayo a la Compresión de Elemento Cubo.



Figura 37

Ensayo a la Compresión de Elemento Cubo



Figura 38

Ensayo a Tensión



Figura 39

Toma de Dimensiones Elemento cubo



Figura 40

Ensayo de Velocidad de Propagación de Ondas Ultrasónicas



Figura 41

Ensayo de Velocidad de Propagación de Ondas.



Figura 42

Ensayo a la Compresión Elemento Cubo.



Figura 43

Densidad de la Muestra Cubo.



Figura 44

Dimensiones de Muestra Cilindro.



Figura 45

Peso de la Muestra Cubo Después de la





Figura 46

Ensayo a la Compresión Elemento Panel.

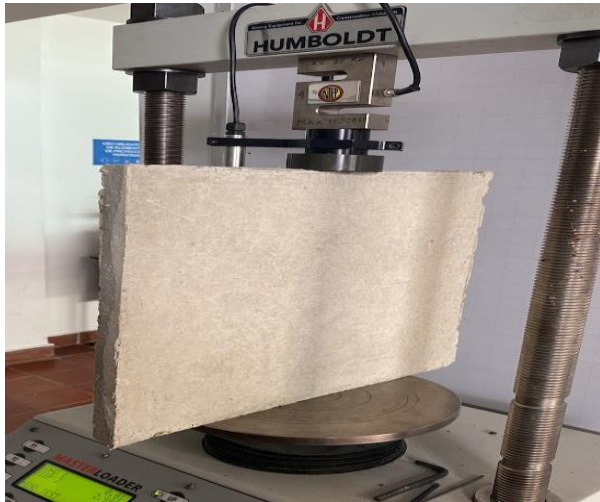


Figura 47

Ensayo a la Compresión Elemento Panel.





9.6 Aplicación del material

Figura 48

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Nota: Cabaña rural para uso turístico Anolaima Cundinamarca .

Figura 49

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Nota: Casa campestre modular 2 plantas con estructura metálica en Anolaima cundinamarca.

Figura 50

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Nota: Casa campestre modular 2 plantas con estructura metálica en Anolaima cundinamarca.

Figura 51

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Figura 52

Instalación del Panel Modular para División Muros con Acabados



Nota: Cabaña rural terminada en Anolaima cundinamarca.

Figura 53

Panel Modular Para Muros



Nota: paneles modulares en proceso de secado

Figura 54

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Nota :Casa campestre modular 2plantas sistema mixto
estructural en Anolaima cundinamarca.

Figura 55

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Nota: Escuela rural Santa barbara de Anolaima
cundinamarca.

Figura 56

Instalación del Panel Modular para División de Muros.



Nota: Vivienda rural concepto moderno sistema estructural metalico, 2 plantas en Anolaima

Figura 57

Instalación del Panel Modular para División.



cundinamarca.

Nota: Divisiones internas escuela rural Santa Barbara de Anolaima Cundimarca.

Figura 58

Instalación del Panel Modular para División.



Nota: vivienda Rural concepto moderno sistema estructural metalico, 2 plantas en Anolaima

Figura 59

Panel Modular Para Muro y Chimenea.



cundinamarca.

Nota: Casa campestre etapa final vista interna en Anolaima Cundinamarca.

Figura 60

Panel Modular en Fachada



Nota : Vista externa casa campestre sistema mixto estructural 2 plantas

Figura 61

Placas Aéreas con Alma en Malla de Acero.



Nota: placa de extension aerea sistema estructural paneles con nucleo en malla de acero

Figura 62

Panel Modular en Facha.



Nota: vivienda Rural concepto moderno sistema estructural metalico, 2 plantas en Anolaima cundi.

Figura 63

Sistema de Atraque con el Panel Modular.



Nota: demostracion de proceso constructivo

Figura 64

Sistema de Atrache con el Panel Modular.



Nota: sistema constructivo de atraque

Figura 65

Panel Modular Texturizado



Nota: conceptos texturizados para ambientar en interiores y exteriores

Figura 66

Placa Fácil con Panel Modular



Nota: Sistema de placa fácil con paneles modulares estructura en correas tubulares metálicas

Figura 67

Placa Fácil con Panel Modular.



Nota: : Sistema de placa fácil con paneles modulares estructura en correas tubulares metálicas

APLICACIONES DEL MATERIAL

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, el material desarrollado, compuesto por una matriz cementicia modificada con celulosa de papel y fibras plásticas recicladas, presenta propiedades adecuadas para su uso en aplicaciones no estructurales dentro del sector de la construcción.

Su rango de resistencia a compresión (4 MPa a 18 MPa), junto con su baja densidad y carácter liviano, permite su implementación en los siguientes usos:

10.1 Muros divisorios

El material puede emplearse en la construcción de muros no portantes en edificaciones residenciales y comerciales, donde no se requiera capacidad estructural. Su uso permite reducir el peso total de la edificación y facilitar los procesos constructivos.

10.2 Paneles prefabricados livianos.

Es viable su utilización en la fabricación de paneles modulares prefabricados, los cuales pueden ser instalados rápidamente en obra. Esta aplicación favorece la industrialización de la construcción y la reducción de tiempos de ejecución.

10.3 Cerramientos y fachadas livianas.

El material puede ser utilizado en cerramientos perimetrales y fachadas no estructurales, especialmente en construcciones de baja altura, donde se prioricen soluciones livianas y de rápida instalación.

10.4 Vivienda de interés social (VIS).

Debido a su bajo costo potencial y al uso de materiales reciclados, el sistema representa una alternativa viable para proyectos de vivienda de interés social, contribuyendo a la reducción de costos y al aprovechamiento de residuos.

10.5 Elementos de aislamiento térmico y acústico.

La presencia de celulosa y fibras plásticas puede aportar propiedades de aislamiento, lo que permite su uso en soluciones constructivas orientadas al confort térmico y acústico en espacios interiores.

10.6 Soluciones constructivas sostenibles

El material se posiciona como una alternativa sostenible frente a sistemas tradicionales, al incorporar residuos reciclados y reducir el consumo de agregados naturales, contribuyendo a la economía circular en el sector construcción.

ANÁLISIS ECONÓMICO

El material desarrollado incorpora residuos como celulosa de papel y fibras plásticas recicladas, lo que representa una reducción en el uso de agregados convencionales y potencialmente, una disminución en los costos de producción.

En comparación con sistemas tradicionales como la mampostería en bloque o ladrillo, el material presenta ventajas como:

Menor peso → reducción en costos de transporte y estructura

Mayor facilidad de instalación → reducción en mano de obra

Aprovechamiento de residuos → impacto ambiental positivo

Analisis de precio unitario

Ítem	Und.	Cantidad	V. unitario	Parcial
Panel MCP 5 cm	und	1.4493	\$65.000	\$94,203
Tornillos	und	28.99	\$200	\$5,797
Masilla de juntas	kg	1,00	\$2.000	\$2.000
Instalación paneles (2 caras)	m ²	2,0	\$15.000	\$30,000

Mano de obra masilla	m ²	1,0	\$2.500	\$2.500
Transporte + cargue + descargue	m ²	1.4493	\$2.000/panel	\$2,899
COSTO DIRECTO				\$137,399
Utilidad 30%				\$41,220
PRECIO FINAL				\$178,618/m ²

Tabla 19

Cuadro comparativo con otros Elementos

Sistema constructivo	Costo aproximado (COP/m ²)	Observación
Mampostería tradicional	\$180.000 – \$220.000	Mayor peso, más lenta
Drywall	\$80.000 – \$120.000	Más liviano, menor resistencia
Panel desarrollado	\$178.618	Más económico, sostenible

El material desarrollado presenta una ventaja económica preliminar frente a sistemas tradicionales, lo que, sumado a sus propiedades mecánicas y su carácter sostenible, lo convierte en una alternativa viable para aplicaciones no estructurales en el sector de la construcción

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Durante el desarrollo de la presente investigación se identificaron diversas limitaciones que deben ser consideradas al momento de interpretar los resultados obtenidos.

En primer lugar, no se realizaron ensayos de durabilidad a largo plazo, por lo que no es posible establecer con certeza el comportamiento del material frente a condiciones

ambientales como ciclos de humedad-sequedad, exposición a agentes agresivos o envejecimiento.

Asimismo, no se evaluaron propiedades mecánicas complementarias como la resistencia a flexión o el comportamiento post-fisuración, las cuales son relevantes para materiales destinados a aplicaciones en paneles o muros divisorios.

Otra limitación importante corresponde a la variabilidad en los resultados experimentales, evidenciada en coeficientes de variación elevados en algunos diseños de mezcla. Esta dispersión se asocia principalmente al control de variables como la relación agua-cemento y la absorción de la celulosa, la cual alcanzó valores del 60%.

Adicionalmente, las condiciones de fabricación utilizadas corresponden a un entorno no industrializado, lo cual puede influir en la repetibilidad de los resultados y en la homogeneidad del material.

Finalmente, no se llevó a cabo una evaluación detallada de propiedades térmicas y acústicas, las cuales podrían representar una ventaja adicional del material debido a la incorporación de componentes reciclado.

CONCLUSIONES

El nuevo diseño de mezcla demuestra un desempeño técnico adecuado y cumple con los requisitos generales normativos para su uso en edificaciones según la NSR-10. Se recomienda avanzar con su promoción en proyectos piloto y presentar el producto ante entidades certificadoras nacionales.

Consideración normativa según la NSR-10

De acuerdo con la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR-10, específicamente en el Título A, Capítulo A.9 correspondiente a elementos no estructurales, el material desarrollado puede considerarse apto para aplicaciones en muros divisorios,

cerramientos y paneles livianos, siempre que no desempeñe funciones estructurales o portantes dentro de la edificación.

En este sentido, el sistema propuesto se enmarca dentro de los elementos no estructurales permitidos por la normativa colombiana, los cuales pueden ser utilizados en edificaciones siempre que se garantice su adecuada instalación, estabilidad y seguridad frente a cargas de servicio y efectos sísmicos.”

Las probetas expuestas a ambientes húmedos o con mayor contenido de humedad durante el curado presentaron valores de resistencia inferiores, lo cual se asocia a una mayor porosidad y menor compactación interna de la matriz cementicia.

Efecto de la relación agua-cemento (a/c):

Se evidenció que la relación agua-cemento desempeña un papel determinante en el comportamiento mecánico del mortero. Relaciones a/c elevadas, aunque mejoran la trabajabilidad, tienden a generar mezclas más porosas y con menor resistencia a compresión, especialmente cuando se incorpora material reciclado como papel o fibras plásticas que ya aportan absorción adicional.

La absorción de agua de la celulosa, estimada en un 60%, influye directamente en el comportamiento mecánico del material, incrementando la porosidad y reduciendo la resistencia a compresión. Este factor se identifica como una de las principales variables que afectan la uniformidad del material, por lo que se recomienda su control mediante pretratamientos o ajustes en la dosificación de agua

Comportamiento combinado con materiales reciclados:

Las fibras plásticas y el papel, al tener diferente capacidad de absorción de agua, afectan la distribución interna del contenido de humedad y modifican el proceso de hidratación del cemento. Esta interacción puede amplificar los efectos negativos de una

relación a/c alta si no se controlan adecuadamente los tiempos y condiciones de curado.

Importancia del control hídrico:

La necesidad de controlar cuidadosamente tanto la humedad de los materiales como la relación agua-cemento se vuelve aún más crítica cuando se trabajan mezclas con componentes reciclados. Una dosificación precisa y un adecuado régimen de curado pueden mitigar las pérdidas de resistencia observadas.

El presente estudio permitió evaluar el comportamiento de un material cementicio modificado con celulosa de papel y fibras plásticas recicladas, evidenciando su viabilidad para aplicaciones no estructurales en el sector de la construcción.

Se obtuvo un rango de resistencia a compresión entre 4 MPa y 18 MPa, destacándose la mezcla con relación agua-cemento controlada con un valor promedio de 14,62 MPa. Sin embargo, esta presentó una alta variabilidad ($CV = 26\%$), lo que limita su confiabilidad en condiciones no controladas.

Las mezclas con inclusión de fibras plásticas mostraron resistencias menores (alrededor de 6 MPa), pero con coeficientes de variación inferiores al 10%, lo que indica un comportamiento más uniforme y estable, siendo una alternativa más confiable desde el punto de vista constructivo.

Se identificó que la absorción de agua de la celulosa (60%) es la variable más influyente en el comportamiento del material, ya que altera la relación agua-cemento efectiva, incrementa la porosidad interna y afecta tanto la resistencia como la uniformidad de los resultados.

La inclusión de arena de río generó una disminución en la resistencia mecánica, mientras que el curado en horno no mostró mejoras significativas y aumentó la dispersión de los resultados, evidenciando que no es un método adecuado para este tipo de material.

Desde el punto de vista económico, el material presenta un costo aproximado de \$60.000 COP/m² en planta, lo cual lo posiciona como una alternativa competitiva frente a sistemas tradicionales, especialmente en aplicaciones no estructurales.

En conclusión, el material desarrollado es técnicamente viable para su uso en muros divisorios, paneles prefabricados y cerramientos livianos, destacándose por su bajo peso y su contribución a la sostenibilidad. No obstante, requiere optimización en el control de sus variables de fabricación para mejorar su desempeño y confiabilidad en aplicaciones reales.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y para la optimización del material desarrollado:

Implementar un control riguroso de la humedad de la celulosa, mediante procesos de pre-saturación o secado controlado, con el fin de reducir la variabilidad en la relación agua-cemento efectiva.

Ajustar la dosificación de agua considerando la absorción del 60% de la celulosa, con el objetivo de garantizar una hidratación adecuada del cemento y mejorar la resistencia mecánica.

Evaluar la incorporación de aditivos plastificantes o reductores de agua, que permitan mejorar la trabajabilidad de la mezcla sin incrementar la relación agua-cemento.

Realizar ensayos adicionales de resistencia a flexión, comportamiento post-fisuración y adherencia, especialmente si el material será utilizado en sistemas tipo panel.

Desarrollar estudios de durabilidad, incluyendo ensayos de absorción, permeabilidad y ciclos ambientales, con el fin de validar su comportamiento a largo plazo.

Analizar las propiedades térmicas y acústicas del material, considerando su potencial

aplicación en soluciones constructivas de confort.

Estandarizar el proceso de fabricación mediante condiciones más controladas o industrializadas, para reducir la dispersión de resultados y mejorar la calidad del producto final.

Se recomienda mantener relaciones agua-cemento optimizadas (no superiores a 0.50), ajustar el contenido de agua según la absorción de los materiales reciclados, y aplicar métodos de curado adecuados para asegurar una hidratación uniforme y completa del sistema cementante.

REFERENCIAS

American standards for testing materials ASTM (2003) Standard specification for fiber reinforced concrete C1116. ASTM international, West Conshohocken, PA. USA

Blanco A. (2008) Durabilidad del hormigón con fibras de acero. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de Grado.

Rodríguez López, F. y Prado Pérez-Seoane, D. Octubre de (1984), Estado General del Conocimiento. Universidad Politécnica de Cataluña accesado en:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6557/05.pdf?sequence=6> el 25

de noviembre 2024.

Román JM (2015) Análisis de las propiedades del concreto reforzado con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno: influencia del tipo y consumo de fibra adicionado. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México, México DF, México.

Cementos Mexicanos CEMEX. (2024) Concreto con Fibras Sintéticas, acceso en: <https://www.cemexcolombia.com/documents/45752949/45757466/concretofibra>

ssinteticas.pdf/bd87adbc-0081-4dd3-03d5-54482cdfaf8d el 20 de noviembre de 2024.